

DOI: 10.11779/CJGE201805003

节理岩体中锚杆剪切力学模型研究及试验验证

刘泉声^{1, 2}, 雷广峰^{*1, 3}, 彭星新^{1, 3}, 魏 莱^{1, 3}

(1. 中科院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 依据最小余能原理, 在考虑节理岩体中锚杆剪切变形的基础上, 分析了节理面水平剪切位移与锚杆轴向及切向变形之间的关系。结合锚杆受力特点拟定了锚杆屈服模式的判定流程。建立了考虑“等效剪切面积”的加锚节理面抗剪强度理论计算模型, 并通过室内物理试验验证了理论计算模型的准确性。讨论了锚杆倾角、围岩抗压强度、锚杆直径、法向应力等因素对加锚节理面抗剪强度的影响规律。结果表明: 所建立的锚杆剪切力学模型能够较好的反映锚杆轴向力及剪切力对节理面抗剪强度的贡献; 考虑“等效剪切面积”的加锚节理面抗剪强度计算结果与试验结果较为吻合; 锚杆倾角及围岩抗压强度越大, 锚杆轴向力越小, 剪切力越大; 锚杆直径增大, 锚杆轴向力及剪切力都会增大; 节理面法向应力会显著影响剪胀效应, 法向应力越大, 节理面抗剪强度越高。

关键词: 节理岩体; 锚杆锚固; 抗剪强度; 物理试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)05-0794-08

作者简介: 刘泉声(1962-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn。

Shearing mechanical model and experimental verification of bolts in jointed rock mass

LIU Quan-sheng^{1, 2}, LEI Guang-feng^{*1, 3}, PENG Xing-xin^{1, 3}, WEI Lai^{1, 3}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the principle of the minimum residual energy, the relationship between the horizontal shear displacement of the joint surface and the axial and tangential deformation of the bolt is analyzed considering the shear deformation of the bolts in jointed rock mass. The judgment process of the yield mode of the bolt is determined by analyzing the characteristics of the loading on the bolts. The formula for calculating the shear strength of the anchoring joint surface is established considering the equivalent shearing area, and the accuracy of the theoretical calculation is verified by the indoor physical experiments. The influence of bolt inclination, surrounding rock strength, bolt diameter and normal stress on the shear strength of the anchoring joint surface is discussed. The results show that the shearing mechanical model can better reflect the contribution of the axial force and shearing force of the bolts to the shear strength of the joints. The calculated results of the shear strength of the anchoring joint surfaces considering the equivalent shearing area are in good agreement with the experimental ones. The greater the inclination of the bolts and the strength of the surrounding rock, the smaller the axial force of the bolts but the greater the shear force. The axial force and shear force of the bolts will increase with the increase of the diameter of the bolts. The normal stress of the joint surface will significantly affect the dilatancy effect, and the greater the normal stress, the higher the shear strength of the joint.

Key words: jointed rock; bolt anchoring; shear strength; physical test

0 引 言

自然岩体中节理面普遍存在, 许多岩土工程都是由于节理面的存在导致失稳破坏。锚杆锚固技术因其工艺简便、经济高效的特点, 目前已被广泛应用于矿

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(2014CB046904); 国家自然科学基金面上项目(51474205)

收稿日期: 2017-03-14

*通讯作者(E-mail: gfrei_whrs@foxmail.com)

山隧道、堤坝边坡等岩土加固工程的各个领域, 其良好的加固效果也得到了业内专家学者的一致认可^[1-2]。在众多的锚杆锚固工程实例中, 常见的锚杆破坏方式有局部被拉断、剪坏、剪弯、扭曲等, 锚杆的破坏多与节理面的剪切错动有关, 节理面的剪切位移特性极大的影响锚杆的破坏特征。节理岩体所处的地质力学环境复杂, 导致锚杆与节理岩体间的力学作用机理难以准确把握。理论研究中忽略次要因素, 在一定的假设前提下建立节理岩体锚杆力学模型, 有利于分析加锚节理岩体的变形及受力特征, 从而更好地指导锚固工程的设计与施工。目前为止, 国内外诸多专家学者开展了大量有关节理岩体锚杆锚固机理的理论及试验工作^[3-5], 取得了卓有成效的研究成果。

Spang 等^[6]通过物理试验研究了锚杆在不同性质岩体中的加固效应, 指出锚杆能够显著提高节理岩体的抗剪强度, 岩体自身的抗变形能力是影响加锚节理岩体抗剪强度的重要参数之一。Ferrero^[7]研究了不同岩石材料中, 改变锚杆类型、锚固方式等因素对加锚节理岩体抗剪强度的影响规律。Chen^[8]通过大型的物理模型试验研究了拉-剪复合应力作用下, 节理岩体中锚杆变形特征, 提出了一种评估岩石锚杆锚固效果的新方法。Yoshinaka^[9]系统研究了裂隙面粗糙度对加锚节理岩体剪强度的影响规律, 拟合了加锚节理岩体抗剪强度与锚杆数量、锚杆倾角等参数之间的关系。张治强等^[10]通过室内模拟试验研究了不同锚固方式条件下, 节理岩体剪切刚度及位移变形特征, 试验结果表明, 加锚节理岩体抗剪强度及节理面切向刚度增强, 抗变形能力提高。杨松林等^[11-12]、陈文强等^[13]理论研究与物理试验相结合, 分析了加锚节理岩体剪切过程中锚杆的轴向作用及横向作用, 所建立的理论模型与试验结果较为吻合。

本文在分析节理岩体中锚杆剪切力学模型的基础上, 建立了考虑“等效剪切面积”的加锚节理面抗剪强度公式, 并通过室内物理试验对该公式进行了验证, 所得的计算结果与试验结果较为吻合。结合试验结果, 讨论了剪切过程中锚杆轴向力及剪切力所占比重随着锚杆倾角、围岩抗压强度、锚杆直径及节理面法向应力等因素的变化规律, 进而分析各因素对加锚节理面抗剪强度的影响。最后分析了剪切试验过程中, 锚杆及节理岩体的变形破坏特征。

1 锚杆抗剪效应分析

1.1 锚杆变形及受力

锚杆锚固在限制节理面的剪切变形, 提高加锚节理面抗剪强度方面效果显著。通常情况下, 加锚节理

面在剪切荷载作用下, 由于剪胀效应, 会同时发生剪切位移和法向位移(如图1所示)。节理面发生剪切位移时, 锚杆受到围岩材料的挤压, 内部会同时产生轴向力和横向剪切力, 锚杆发生轴向变形和切向变形, 宏观表现为锚杆在节理面附近发生近“S”形变形(如图2所示)。图中 O 点为锚杆轴线与节理面的交点, 该处锚杆内部弯矩为0, 只有轴力与剪切力; A, B 两点处锚杆弯曲率最大, 锚杆内弯矩最大, 剪力为0。 U_0 为锚杆轴线沿节理面的剪切位移, 即节理面的水平剪切位移, u_0, v_0 分别表示锚杆轴向与切向的位移分量; P_u 表示单位长度锚杆受到周围岩体材料的极限反力; α 为锚杆倾角(锚杆轴线与节理面之间的夹角)。

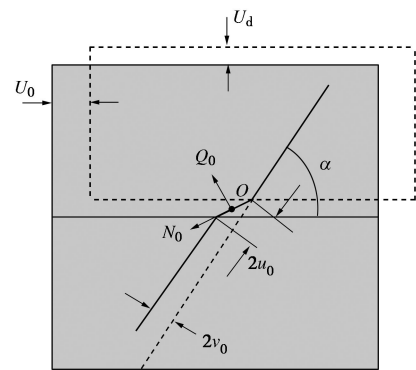


图1 节理面变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of deformation of joint surface

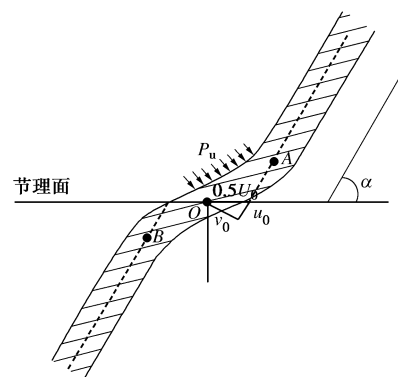


图2 锚杆剪切变形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shear deformation of bolts

假设节理面的水平剪切位移为 U_0 , 那么由剪胀效应产生的节理面法向位移为 U_d 。节理面处锚杆内部的轴向力为 N_0 , 节理面处锚杆内的横向剪切力为 Q_0 。结合图1, 2 可得, 加锚节理面剪切位移 U_0 、法向位移 U_d 与锚杆杆体的轴向位移分量 u_0 、切向位移分量 v_0 满足以下几何关系:

$$u_0 = 0.5(U_0 \cos \alpha + U_d \sin \alpha) \quad (1)$$

$$v_0 = 0.5(U_0 \sin \alpha - U_d \cos \alpha) \quad (2)$$

式中, $U_d = U_0 \tan \psi$, ψ 为节理面剪胀角^[14]。

加锚节理岩体的变形以节理面为对称面呈现出中心对称形式。对节理岩体中的锚杆进行受力分析时,可将锚杆看作半无限长梁,在锚杆与节理面交界处的 O 点同时施加轴向力 N_0 和剪切力 Q_0 (如图3所示)。

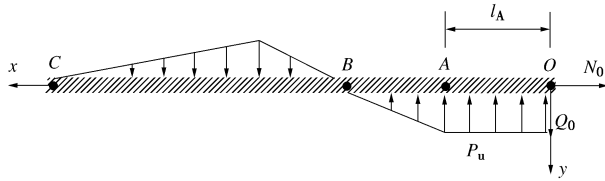


图3 锚杆受力分析图

Fig. 3 Analytical diagram of loads on bolts

Hetenyi^[15]将节理岩体中的锚杆看作半无限长梁,其研究表明,节理面发生剪切滑动时,节理面一侧的锚杆内各点的轴向位移 $u(x)$ 和横向位移 $v(x)$ 与锚杆 O 点处的轴向位移 u_0 和横向位移 v_0 满足以下关系:

$$u(x) = -u_0 \left(1 - \frac{2x}{3\pi l_0} \right), \quad (3)$$

$$v(x) = v_0 e^{-x/l_0} \cos\left(\frac{x}{l_0}\right), \quad (4)$$

式中, $l_0 = \pi/4 \cdot l_A$, l_A 为 O 点到 A 点的距离。

Pellet 等^[16]研究了锚杆剪切过程中内力与变形之间的关系,通过计算节理面一侧锚杆的应变能与外力所做的功能够得到锚固系统的总余能,考虑锚杆杆体位移分量 u_0 , v_0 ,得出当余能最小时,锚杆杆体位移与内力之间存在以下关系:

$$u_0 = \frac{24N_0Q_0}{Ep_u\pi D_b^2}, \quad (5)$$

$$v_0 = \frac{8192Q_0^4b}{E\pi^4 p_u^3 D_b^4}, \quad (6)$$

式中, E 为锚杆的弹性模量, D_b 为锚杆直径, b 为一常量, $b=0.27$ 。

锚杆周围岩体产生的单位长度极限反力 P_u 的对节理面极限抗剪强度影响较大。Holmberg^[17]系统分析了影响因素 P_u 的因素,研究表明 P_u 主要受围岩抗压强度 σ_c 及锚杆直径 D_b 的影响,

$$P_u = n\sigma_c D_b. \quad (7)$$

需要特别说明的是,式(7)中的 n 为反力系数,其取值与围岩抗压强度负相关,二者具体的关系如图4所示。

1.2 锚杆屈服模式

加锚节理岩体水平剪切力作用下,随剪切位移 U_0 的增大,锚杆可能发生两种屈服模式:①剪切屈服,即锚杆在轴向拉应力与切向剪应力共同作用下,在节理面的 O 点发生拉剪破坏;②弯曲屈服,锚杆在拉应力与弯矩共同作用下,在弯矩最大点 A 点发生拉弯破

坏, A , B 点为拉弯破坏时形成的对称于节理面的两个塑性铰。Li 等^[18]研究发现:节理岩体中锚杆的屈服模式与围岩反力密切相关,并定义了“临界反力” P_0 :

$$P_0 = 0.46\sigma_y D_b, \quad (8)$$

式中, σ_y 为锚杆的屈服应力, D_b 为锚杆杆体直径。

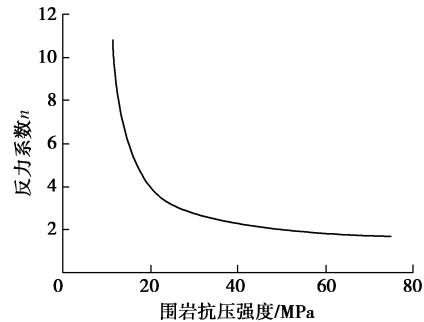


图4 不同围岩抗压强度对应的 n 值^[17]

Fig. 4 Variation of n -values with different rock mass strengths^[17]

Pellet 指出,节理岩体中锚杆的屈服模式可由围岩的反力 P_u 初步判定:当 $P_u < P_0$ 时,锚杆会在 A 点发生屈服,破坏模式为拉弯破坏,此时会形成两个塑性铰;当 $P_u = P_0$ 时,锚杆会在 O 点和 A 点同时发生屈服;当 $P_u > P_0$ 时,锚杆在 O 点屈服,破坏模式为拉剪破坏。该方法只能初步的判定锚杆的屈服模式,结论较为粗糙。

分析锚杆自身的受力特点,发生拉剪屈服时,锚杆材料的屈服符合 Von-Mises 准则:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{N_{0y}}{A_b}\right)^2 + 3\left(\frac{Q_{0y}}{A_b}\right)^2}, \quad (9)$$

式中, σ_y 为锚杆的屈服应力, N_{0y} , Q_{0y} 分别为锚杆屈服时 O 点处的轴向力与剪切力, A_b 为锚杆截面面积。

发生弯曲屈服时,锚杆屈服点 A 处受到弯矩和轴力的共同作用,根据弹性地基梁理论,锚杆内力满足屈服条件:

$$1.7\sigma_y = \frac{M_A}{W} + \frac{N_{0y}}{A_b}. \quad (10)$$

式中, σ_y 为锚杆的屈服应力, M_A 为塑性铰 A 点处的弯矩, $M_A = Q_{0y}^2/2P_u$, W 为锚杆界面静矩, $W = \pi D_b^3/32$, N_{0y} 为锚杆屈服时的轴力, A_b 为锚杆截面面积。

通过以上分析可知,假设给定一个节理面初始剪切位移 U_0 ,由式(1)、(2)可计算出锚杆轴向及切向位移分量 u_0 , v_0 ,然后由式(5)、(6)可计算出锚杆轴向力 N_0 和横向剪切力 Q_0 ,判断此时的 N_0 , Q_0 是否满足式(9)或式(10),若不满足,则增加初始剪切位移 U_0 进行连续迭代计算,得到满足式(9)或式(10)时的 N_0 , Q_0 。通过上述计算可得锚杆发生拉剪屈服和

弯曲屈服时的节理面剪切位移 U_{0y} 、锚杆轴力 N_{0y} 、横向剪切力 Q_{0y} 、轴向位移分量 u_0 及切向位移分量 v_0 。最后需要进行一次判定：锚杆发生拉剪屈服的条件为理论计算得到的锚杆拉剪屈服时的节理面剪切位移小于弯曲屈服时的剪切位移；锚杆弯曲屈服的条件与之相反。锚杆屈服状态具体的判定流程如图 5 所示。

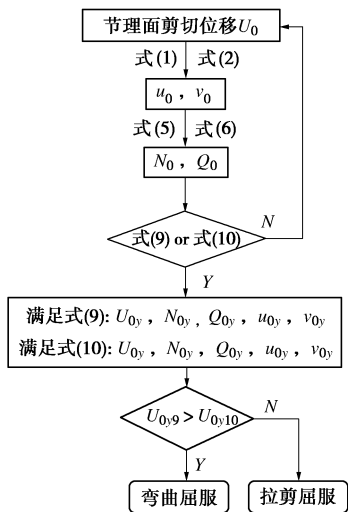


图 5 锚杆屈服模式判断流程

Fig. 5 Judgment process of yield mode of bolts

1.3 加锚节理面抗剪强度模型

在此需要特别强调的是，已有的加锚节理岩体抗剪强度模型在考虑锚杆对节理面抗剪强度的贡献时，往往将锚杆轴力 N_0 、剪切力 Q_0 与锚杆截面面积 A_b 的比值作为应力平均效应的参考。然而锚杆截面与节理面相比较小，将锚杆截面面积内的应力简单的累加与节理面强度公式中与实际的锚杆强度贡献偏差较大。为建立更合理的加锚节理面抗剪强度模型，在此提出“等效剪切面积”的概念，定义等效剪切面积为锚杆直径与节理面宽度（岩块边长）或锚杆间距的乘积（如图 6 所示）：

$$A_e = D_b \cdot L \quad , \quad (11)$$

式中， D_b 为锚杆直径， L 为试件边长或锚杆间距。

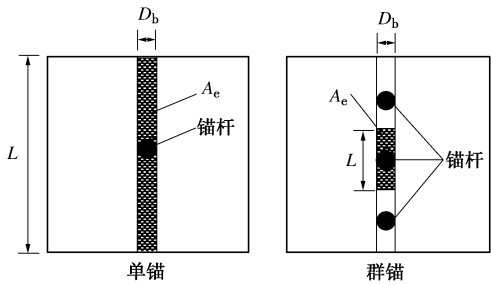


图 6 等效剪切面积示意图

Fig. 6 Diagram of equivalent shear area

锚杆对节理面剪切强度的贡献需考虑等效剪切面积的影响，即锚杆内力的影响范围不仅仅是杆体截

面，而是节理面与锚杆交界处一定范围内，这在一定程度上削弱了单根锚杆轴力及剪力对节理面强度的贡献值。通过试验验证发现，考虑等效剪切面积的节理面抗剪强度模型更符合锚杆加固的实际情况。

节理岩体抗剪强度符合莫尔-库仑强度准则，即 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 。加锚节理面抗剪强度由节理面本身抗剪强度 τ_j 和锚杆对节理面贡献的抗剪强度 τ_b 两部分，即加锚节理面的抗剪强度 τ 可表示为

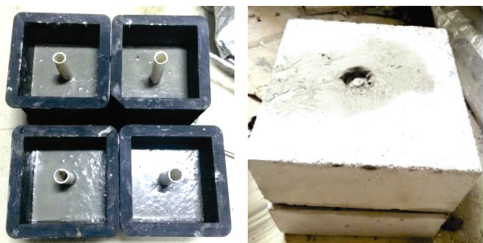
$$\tau = \tau_j + \tau_b \quad . \quad (12)$$

式 中 $\tau_j = \sigma_j \tan(\varphi + \psi) + c_j$; $\tau_b = \tau_{bn} + \tau_{bt}$; $\tau_{bn} = \frac{N_{0y}}{A_e} [\sin \alpha \tan(\varphi + \psi) + \cos \alpha]$; $\tau_{bt} = \frac{Q_{0y}}{A_e} [\sin \alpha - \cos \alpha \tan(\varphi + \psi)]$ 。其中， φ 为节理面内摩擦角， ψ 为考虑剪胀效应的剪胀角， c_j 为节理面黏聚力， τ_{bn} ， τ_{bt} 分别为锚杆轴向力、剪切力对节理面抗剪强度的贡献。

2 物理试验验证

2.1 试验概况

为验证考虑“等效剪切面积”的加锚节理面抗剪强度模型的合理性，开展了不同节理面法向应力作用下，无锚节理岩体及加锚节理岩体的直剪试验。岩石相似材料选取一定配比的水泥砂浆，水泥选用 32.5 普通硅酸盐水泥，石英砂选用 80 目的中细砂，配比为水：水泥：石英砂=1：2：4。试验中选用 HRB400 型螺纹钢作为锚杆相似材料，锚杆直径 $D_b=12$ mm，屈服强度 $\sigma_y=400$ MPa，弹性模量 $E=200$ GPa。浇筑成型的节理岩体试块尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm。试件在室内整体养护 28 d 后在预留钻孔内施加锚杆锚固，锚杆与节理面倾角为 90°，并在锚杆与孔洞之间灌注素水泥浆，试块上、下盘间同样浇筑 3 mm 厚素水泥浆，水灰比为 0.42。直剪试验采用中科院武汉岩土力学与工程国家重点实验室研制的 RMT-150C 岩石力学加载试验系统，加载方式为位移控制方式，位移加载速率为 0.01 mm/s，节理面法向应力分别为 1.6，2.4，3.2，4，4.8 MPa。试验过程如图 7 所示。直剪试验加载方案如表 1 所示，该配比下，水泥砂浆岩石材料的力学参数如表 2 所示。



(a) 节理岩体试块浇筑过程

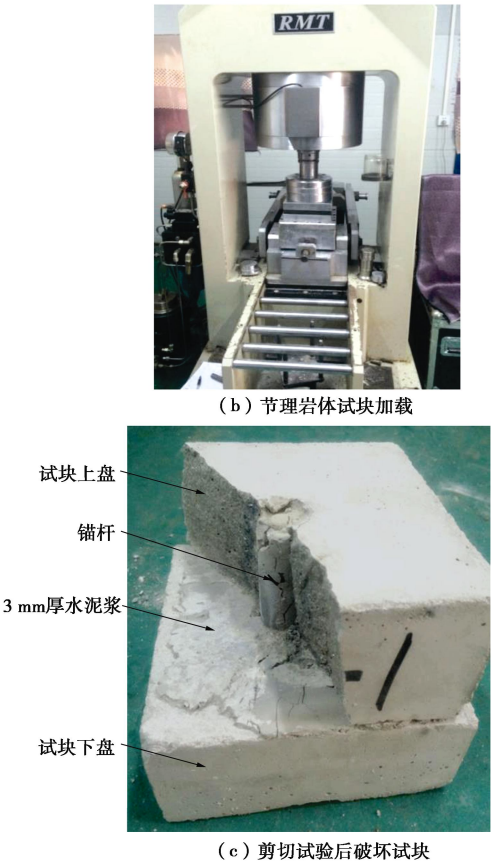


图 7 直剪试验过程

Fig.7 Process of direct shear tests

表 1 直剪试验加载方案

Table 1 Loading schemes of direct shear tests

锚固情况	法向应力 /MPa	剪切位移终点 /mm	剪切位移极限 /mm
加锚	1.6	10	12
	2.4	10	12
	3.2	10	12
	4.0	10	12
	4.8	10	12
未加锚	1.6	10	12
	2.4	10	12
	3.2	10	12
	4.0	10	12
	4.8	10	12

表 2 围岩材料基本参数

Table 2 Basic parameters of rock materials

试块号	抗压强度/ MPa	弹性模量/GPa	泊松比
1	30.46	5.59	0.18
2	29.24	6.65	0.11
3	25.17	6.02	0.15
4	28.63	5.69	0.16
5	21.75	5.34	0.15
均值	27.05	5.86	0.15

2.2 试验结果分析

本次试验共进行了 5 组不同法向应力条件下的剪切试验。剪切试验得到的无锚节理岩体与加锚节理岩

体在不同法向应力作用下的剪切强度如表 3 所示。节理面的抗剪强度符合莫尔-库仑强度准则。不同法向应力条件下，节理面的抗剪强度及拟合的曲线如图 8 所示。根据莫尔-库仑强度准则线性拟合并反算得出无锚节理面的初始黏聚力 $c=0.754$ MPa，内摩擦角 $\varphi=14.89^\circ$ 。此外，理论计算模型中涉及到的各构件的基本力学参数：锚杆弹性模量=200 GPa，岩块抗压强度=27.05 MPa，锚杆屈服应力=400 MPa，结构面黏聚力=0.754 MPa，结构面内摩擦角=14.89°。

表 3 直剪试验结果

Table 3 Results of direct shear tests

锚固情况	法向应力 /MPa	剪切位移 /mm	剪切强度 /MPa
加锚	1.6	1.47	2.24
	2.4	2.12	3.27
	3.2	2.58	3.66
	4.0	2.98	4.06
	4.8	3.71	4.33
未加锚	1.6	1.34	1.18
	2.4	1.62	1.37
	3.2	1.71	1.65
	4.0	1.87	1.80
	4.8	2.13	2.03

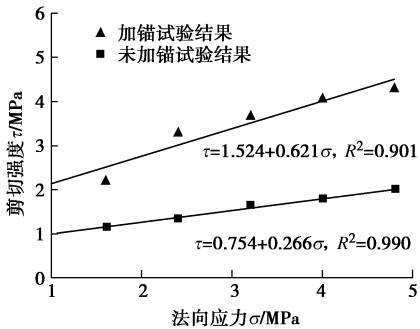


图 8 节理岩体剪切强度与法向应力的关系

Fig. 8 Relationship between shear strength and normal stress of jointed rock mass

剪切试验前选取该配比水泥砂浆制作高径比 2：1 的圆柱形标准试件 5 块，分别进行单轴压缩试验测得其单轴抗压强度，并取 5 块试件单轴抗压强度的平均值作为该配比下围岩材料的抗压强度， $\sigma_c=27.05$ MPa，根据图 4 中围岩抗压强度与反力系数的关系，取反力系数 $n=3$ 。根据前文所述的计算流程，计算得出加锚节理面在不同法向应力作用下剪切强度。通过对比加锚节理面抗剪强度的试验结果与理论计算结果发现（如图 9 所示）：由加锚节理面抗剪强度模型计算得出的理论值与试验值较为吻合，说明本文建立的考虑等效剪切面积的加锚节理岩体抗剪强度模型较为合理。

3 加锚节理面抗剪强度影响因素分析

锚杆对节理面抗剪强度的贡献可从两方面进行

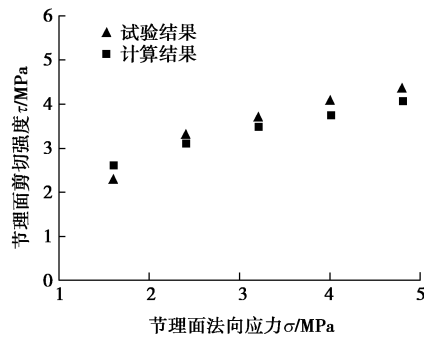


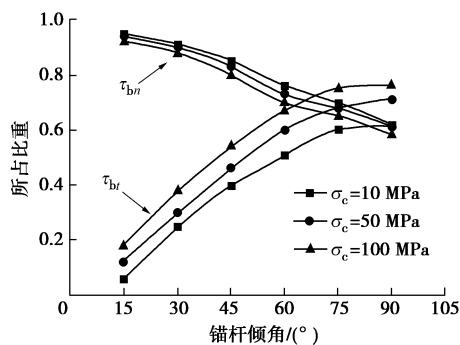
图9 试验结果与计算结果对比图

Fig. 9 Comparison between test and calculated results

分析: 一是锚杆轴向力对节理两壁面产生法向约束效应, 即轴向力贡献的抗剪强度 τ_{bn} ; 另一方面为锚杆剪切力限制节理两壁面间的错动位移, 类似于莫尔-库仑强度理论中的黏聚力 c , 定义锚杆剪切力贡献的抗剪强度为 τ_{br} 。理论研究与工程实例表明^[7], 加锚节理岩体在剪切荷载作用下, 岩体中锚杆的破坏模式大多为拉剪破坏, 只有在少数软岩中锚杆才会发生弯曲破坏。拉剪破坏是锚杆中轴向力与剪切力共同作用的结果, 轴向力与剪切力所占比重的不同会影响 τ_{bn} , τ_{br} 的幅值, 进而对锚杆及节理面的变形及力学效应产生影响。

3.1 锚杆倾角的影响

锚杆倾角会显著影响加锚节理面的剪切力学特性, 锚杆内部轴向力与剪切力对节理面抗剪强度的贡献比重随锚杆倾角而变化。图 10 为根据理论模型计算得出的在抗压强度 σ_c 不同的节理岩体中施加锚杆后, 锚杆对抗剪强度的贡献值 τ_{bn} 及 τ_{br} 随锚杆倾角的比重变化。由图可知, 在围岩抗压强度相同的情况下, 随着锚杆倾角的增大, 轴向力对节理面抗剪强度的贡献 τ_{bn} 比重逐渐减小, 切向力的贡献 τ_{br} 比重逐渐增大。相同锚杆倾角条件下, 随围岩抗压强度的增加, 岩性越来越硬, 剪切位移过程中锚杆提供的轴向力逐渐减小, 剪切力逐渐增大。上述现象与已有研究成果结论一致。

图10 不同围岩强度下 τ_{bn} 及 τ_{br} 随锚杆倾角的比重变化Fig. 10 Change of ratio of τ_{bn} and τ_{br} with inclination of bolts under different surrounding rock strengths

分析图 10 中现象的原因如下: 如图 11 所示, 相同节理面剪切位移 U_0 条件下, 锚杆倾角较小时, 锚杆的轴向位移分量 u_0 较大, 导致锚杆内的拉应力较大, 此时锚杆轴向力对节理面抗剪强度的贡献值 τ_{bn} 较大。当锚杆倾角较大时, 锚杆的切向位移分量 v_0 较大, 此时锚杆的横向剪切力 (销钉作用) 发挥主要的抗剪作用, 即 τ_{br} 所占比重较大。

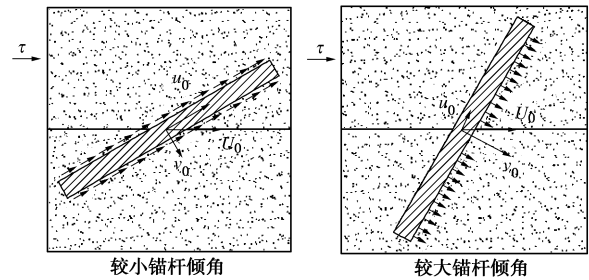


图11 倾角不同的锚杆剪切变形对比图

Fig. 11 Comparison of shear deformations of bolts with different inclinations

3.2 围岩强度的影响

节理岩体施加锚杆后, 围岩将会与锚杆直接接触, 并相互嵌固成一个整体, 围岩材料的物理力学特性将会对加锚节理面的抗剪强度产生重大影响。围岩抗压强度 σ_c 除决定反力系数外, 也会影响 τ_{bn} 及 τ_{br} 的大小 (如图 10 所示), 相同锚杆倾角条件下, 随围岩强度的增大, 锚杆轴向力的贡献 τ_{bn} 所占比重逐渐减小, 剪切力的贡献 τ_{br} 所占比重逐渐增大。分析其原因: 由锚杆剪切变形及受力分析可知 (图 2, 3), 围岩对锚杆的反力 P_u 的作用效果主要是使锚杆内产生横向剪切力, 节理面剪切过程中, 节理面附近的围岩会对锚杆产生挤压作用, 围岩抗压强度越高, 产生相同剪切位移时围岩对锚杆的反力越大, 导致锚杆内横向剪切力越大, 而轴向力则会相应减小, 即剪切力对节理面抗剪强度的贡献比重增大。

3.3 锚杆直径的影响

结合已有研究不难发现, 锚杆直径 D_b 对节理面抗剪强度的影响较大, 由前节中式 (5)、(6) 及式 (12) 推导可知, 增加锚杆直径 D_b , 同时会使锚杆对节理面的抗剪强度贡献值 τ_{bn} 及 τ_{br} 二者相应增大, 可见增加锚杆直径对节理岩体抗剪强度的提高效果更为显著。实际的锚杆加固工程中, 适当地增加锚杆直径也是一种有效地加固手段, 但由于生产条件及工艺设备的限制, 目前应用于施工现场的锚杆尺寸都具有相应的规格, 锚杆直径不能无限增加, 只能在一定的范围内通过增加锚杆直径来提高加固效果。

3.4 节理面法向应力的影响

节理面法向应力也是研究抗剪强度时需要重点

考虑的因素。图 12 为不同法向应力作用下, 加锚节理岩块剪力 - 位移曲线。由图可知, 其他因素相同的情况下, 节理面的抗剪强度随法向应力的增加而增大。法向力对节理面的剪胀效应产生重要影响, 增加法向力能够有效的限制节理两壁面间的法向位移, 使得锚杆的轴向位移相应减小, 导致锚杆内轴向力减小, 即锚杆轴向力对节理面抗剪强度的贡献 τ_{bn} 减小。与轴向力不同的是, 锚杆内的横向剪切力随节理面法向力的增加而增大, 且与轴向力相比占比重大。综合效果而言, 法向力增加, 节理面抗剪强度增大。

另外需要特别指出的是, 图 12 中的曲线分为明显的 3 个阶段。在 A 阶段时, 锚杆与节理块体都处于弹性阶段, 该阶段加载过程中, 岩石块体未出现明显裂纹, 节理面经历很小的剪切位移后, 剪切力即达到一个较高的水平。Li 等^[18]的研究表明: 弹性阶段时锚杆能够有效地限制节理面的错动位移, 该阶段锚杆内的抗剪力能达到其峰值抗剪强度的 85%。在 B 阶段时, 节理面附近的锚杆开始屈服并伴随着周围岩块的破碎, 曲线表现出非线性特征。该阶段锚杆上的作用力达到其屈服强度, 锚杆抵抗变形能力减弱, 剪切力增加缓慢, 剪切变形速度加快。C 阶段时, 剪切力达到锚杆的峰值强度, 锚杆对节理面抗剪强度的贡献 τ_{bn} 及 τ_{br} 达到最大水平, 并发生塑性变形, 加锚节理面达到最大抗剪能力, 且维持在一个相对稳定的水平, 该阶段的特点是节理面位移持续增加, 剪切力保持不变。

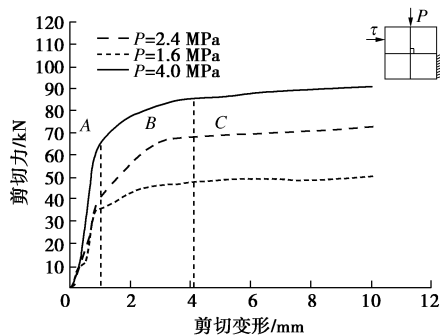


图 12 不同法向应力条件下试件的剪力 - 位移曲线

Fig. 12 Shear-displacement curves of specimens under different normal stresses

4 结 论

(1) 基于 Pellet 的节理岩体中锚杆轴向力与剪切力理论模型, 考虑“等效剪切面积”建立的加锚节理面抗剪强度计算模型较为合理, 物理试验结果与理论计算结果较为吻合。

(2) 锚杆对节理面抗剪强度的贡献主要包括两部分: ①锚杆轴向力对节理两壁面产生法向约束效应,

即轴向力贡献的抗剪强度 τ_{bn} ; ②锚杆剪切力限制节理两壁面间的错动位移, 类似于摩擦黏聚力, 即剪切力贡献的抗剪强度 τ_{br} 。

(3) 理论计算模型与试验结果表明: 锚杆倾角会显著影响节理面的力学特性, 锚杆内部轴向力及剪切力对节理面抗剪强度的贡献比重受锚杆倾角的影响较大。锚杆倾角或围岩抗压强度增大, 锚杆轴向力对抗剪强度的贡献会逐渐减小, 而剪切力对节理面抗剪强度的贡献则逐渐增大; 锚杆轴向力及剪切力对节理面的抗剪强度贡献值 τ_{bn} 和 τ_{br} 都会随锚杆直径的增大而增大。

(4) 节理面法向力主要影响节理面的剪胀效应, 节理面的抗剪强度随法向应力的增大而增大。节理面法向力增大, 锚杆轴向力贡献的抗剪强度减小, 剪切力贡献的抗剪强度增大。加锚节理岩体剪切过程可分为弹性阶段、屈服阶段和塑性变形 3 个阶段。

参考文献:

- [1] 葛修润, 刘建武. 加锚节理面抗剪性能研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(1): 8 - 19. (GE Xiu-run, LIU Jian-wu. Study of the shear resistance behaviour of bolted rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(1): 8 - 19. (in Chinese))
- [2] 张乐文, 汪 稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 627 - 631. (ZHANG Le-wen, WANG Ren. Research on status quo of anchorage theory of rock and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 627 - 631. (in Chinese))
- [3] 李召峰, 李术才, 张庆松, 等. 富水破碎岩体注浆加固模拟试验及应用研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2246 - 2253. (LI Zhao-feng, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Model tests on grouting reinforcement of water-rich broken rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2246 - 2253. (in Chinese))
- [4] 刘新荣, 李栋梁, 吴相超, 等. 泥岩隧道锚承载特性现场模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 161 - 169. (LIU Xin-rong, LI Dong-liang, WU Xiang-chao, et al. Field model tests on bearing behavior of mudstone tunnel anchorage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 161 - 169. (in Chinese))
- [5] 张强勇, 李术才, 陈卫忠. 裂隙岩体加索支护模型及其工程应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1465 - 1468. (ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, CHEN Wei-zhong. Reinforcing model for anchor cable in jointed rockmass and its application to engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,

- 25(9): 1465 - 1468. (in Chinese))
- [6] SPANG K, EGGER P. Action of fully-grouted bolt in jointed rock and factors of influence[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1990, **23**(3): 201 - 229.
- [7] FERRERO A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1995, **32**(6): 595 - 605.
- [8] CHEN Yu. Experimental study and stress analysis of rock anchorage performance[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, **6**(5): 428 - 437.
- [9] YOSHINAKA R, SKAGUCHI S, SHIMIZU T, et al. Experimental study on the rock bolt reinforcement in discontinuous rocks[J]. *Electronics & Communications in Japan*, 1987, **133**(113): 117 - 127.
- [10] 张治强, 张国. 边坡预应力锚固结构的实验研究[J]. *东北大学学报*, 1999, **20**(5): 536 - 539. (ZHANG Zhi-qiang, ZHANG Guo. Experimental study on prestressly anchoring structure of slope[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 1999, **20**(5): 536 - 539. (in Chinese))
- [11] 杨松林, 徐卫亚, 朱焕春. 锚杆在节理中的加固作用[J]. *岩土力学*, 2002, **23**(5): 604 - 607. (YANG Song-lin, XU Wei-ya, ZHU Huan-chun. Reinforcement of bolt in joints[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, **23**(5): 604 - 607. (in Chinese))
- [12] 杨松林, 徐卫亚, 黄启平. 节理剪切过程中锚杆的变形分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(19): 3268 - 3273. (YANG Song-lin, XU Wei-ya, HAUNG Qi-ping. Analysis on the bolt deformation as result of joint shear displacement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(19): 3268 - 3273. (in Chinese))
- [13] 陈文强, 贾志欣, 赵宇飞, 等. 剪切过程中锚杆的轴向和横向作用分析[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(1): 143 - 148. (CHEN Wen-qiang, JIA Zhi-xin, ZHAO Yu-fei, et al. Analysis of axial and transverse effects of rock bolt during shearing process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(1): 143 - 148. (in Chinese))
- [14] 张伟, 刘泉声. 节理岩体锚杆的综合变形分析[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(4): 112 - 119. (ZHANG Wei, LIU Quan-sheng. Synthetical deformation analysis of anchor bolt in jointed rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(4): 112 - 119. (in Chinese))
- [15] HETENYI M. *Beam on elastic foundation: Theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering*[M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 2013.
- [16] PELLET F, EGGER P. Analytical model for the mechanical behavior of bolted rock joints subjected to shearing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1996, **29**(2): 73 - 97.
- [17] HOLMBERG M. *The mechanical behavior of untensioned grouted rock bolts*[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1991.
- [18] LI L, HAGAN P C, SAYDAM S, et al. Shear resistance contribution of support system in double shear test[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, **56**: 168 - 175.